

УДК 621.1.016.7: 621.372.2

Тучин В.Т., Долгополов И.С., Братута Э.Г., Тучина У.Н.

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТОПОЛОГОЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА
ОПИСАНИЯ ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ (ФТС)
(Часть 2)**

Разработка топологоэксергетического метода описания ФТС в рамках развития теоретических основ энергосбережения и энергетического анализа физико-технологических систем является весьма актуальной задачей [1-11].

В предыдущей работе [12]:

1. Сформулирована теорема Телледжена для топологоэксергетических структур связи и выполнено ее доказательство.

2. Получены зависимости, позволяющие анализировать различные топологоэксергетические структуры связи. На примере показано применение этих зависимостей.

3. Для топологоэксергетических структур связи, состоящих из многосвязанных элементов и узлов, сформулировано следствие теоремы Телледжена.

4. Получена математическая формулировка теоремы квазиэксергетической мощности применительно к топологоэксергетическим структурам связи.

5. Показано применение операторов Кирхгофа для обобщенного и компактного представления ФТС в топологоэксергетическом анализе.

6. Представлена формулировка общей и «слабой» форм эксергетической теоремы Телледжена применительно к топологоэксергетическому методу описания ФТС.

Для топологоэксергетического связного графа Γ , состоящего из многосвязных элементов и узлов справедливо, что

$$\sum_{\substack{y \in \hat{a}_i \\ \hat{a}_i \in \hat{u}}} e_i^\delta f_i = 0, \tag{1}$$

где e_i^δ – транспонированные векторы обобщенных эксергетических усилий связей (подчиняются закону Кирхгофа для обобщенных эксергетических усилий) и f_i – векторы обобщенных потоков связей (подчиняются закону Кирхгофа для обобщенных потоков) i -ой многосвязной системы, одновременно существующие в ФТС.

При этом, если ФТС имеет входные переменные, то реализуется выражение

$$\sum_{\hat{a}\hat{\sigma}^3} e_{\hat{a}\hat{\sigma}^3} f_{\hat{a}\hat{\sigma}^3} = \sum_{\hat{a}i j} e_{\hat{a}i j} f_{\hat{a}i j}, \tag{2}$$

где для обозначения внутренних связей и элементов ФТС используется подстрочное обозначение «*вн*»; для обозначения входов – «*вх*».

Для ФТС, рассматриваемых в двух состояниях, может быть выполнено обобщение (2). Под двумя состояниями ФТС подразумеваются действующие состояния двух различных систем, которые имеют одинаковую топологию в виде, например, линейных графов, диаграмм связи или топологоэксергетических структур связи. Тогда обобщение (2) может быть выполнено для ФТС в двух состояниях в следующем виде:

$$\sum_{\alpha\alpha i} f'_{\alpha\alpha i} e''_{\alpha\alpha i} = \sum_{\alpha\alpha \alpha} f'_{\alpha\alpha \alpha} e''_{\alpha\alpha \alpha}, \quad (3)$$

где обозначения «'» и «''» относятся к двум состояниям ФТС.

Теорема квазиэксергетической мощности (3) является трансформированной формой, первоначально данной Телледженом в [13], и примечательна тем, что в соответствии с этой теоремой оба состояния ФТС не должны быть обязательно связаны друг с другом.

Рассмотрим применение теоремы квазиэксергетической мощности на примере ФТС трубопроводов подачи жидкой среды, которая имеет два входа и четыре внутренние линии. Два возможных состояния этой ФТС показаны на рис. 1,2,3 (состояние 1) и рис. 4,5,6 (состояние 2). Оба состояния имеют разные элементы и разные условия подачи входных величин (P – давление, Q – расход).

В одном состоянии есть только сопротивления линий, а в другом – один обратный клапан и одна разомкнутая линия. В обоих состояниях в ФТС подаются различные входные величины. Величины сопротивлений линий указаны на рис. 2,5.

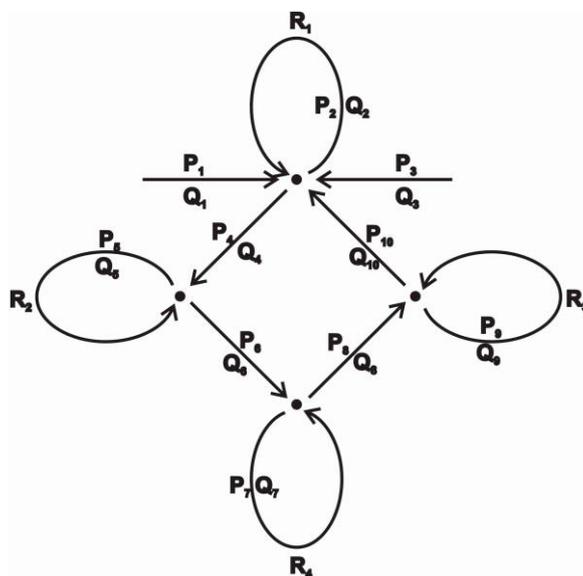


Рисунок 1 – Схема ФТС – трубопроводы подачи жидкой среды (состояние 1)

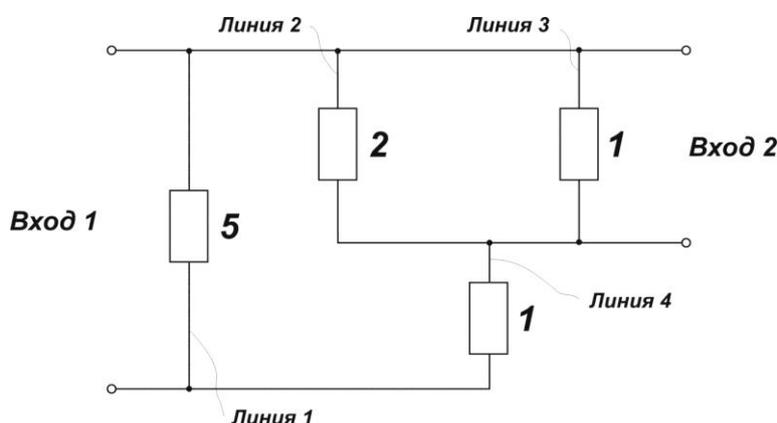


Рисунок 2 – Электрическая цепь – аналог рассматриваемой ФТС – трубопроводы подачи жидкой среды (состояние 1)

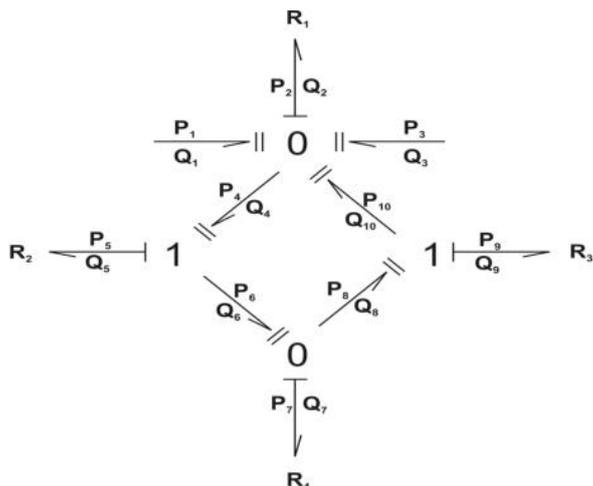


Рисунок 3 – Топологоэнергетическая структура связи ФТС подачи жидкой среды по трубопроводам (состояние 1)

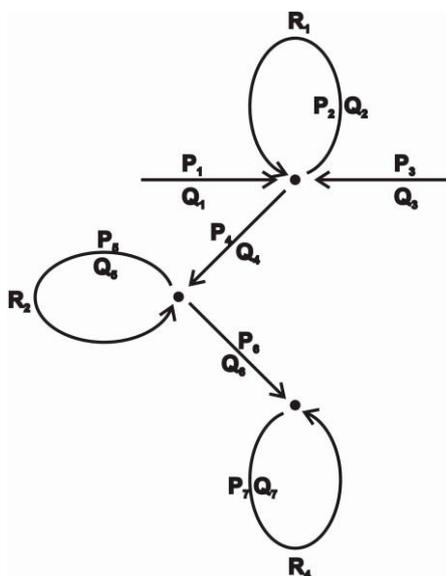


Рисунок 4 – Схема ФТС – трубопроводы подачи жидкой среды (состояние 2)

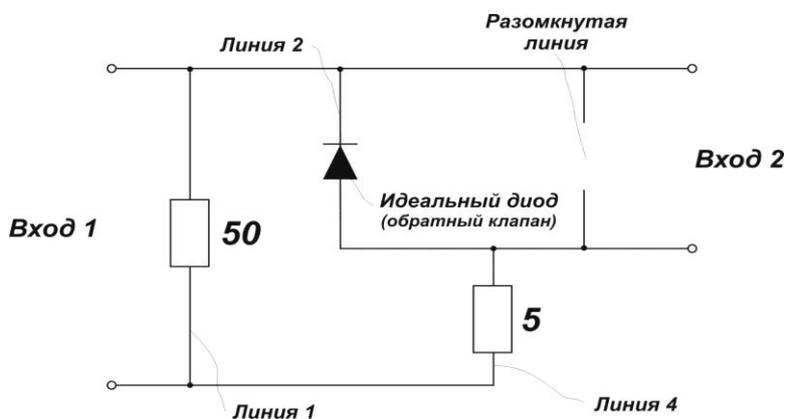


Рисунок 5 – Электрическая цепь – аналог рассматриваемой ФТС – трубопроводы подачи жидкой среды (состояние 2)

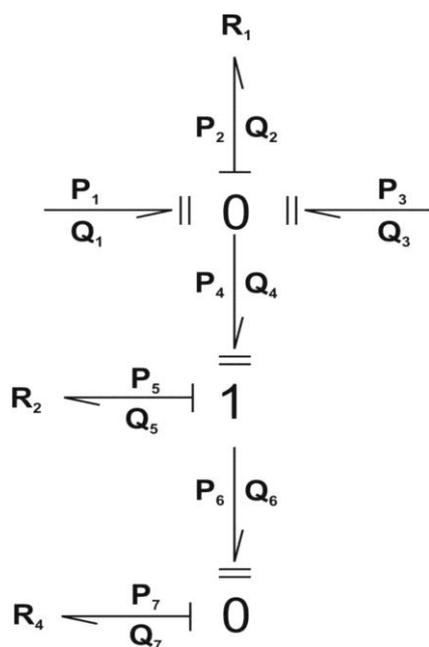


Рисунок 6 – Топологоэксергетическая структура связи ФТС подачи жидкой среды по трубопроводам (состояние 2)

Эксергетические величины давлений и расходов в обоих состояниях приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Эксергетические величины давлений и расходов для всех состояний ФТС

Входы и линии	Состояние 1 (рис. 2,3,4)		Состояние 2 (рис. 5,6,7)	
	$P \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	$Q, \text{м}^3/\text{с}$	$P \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	$Q, \text{м}^3/\text{с}$
Вход 1	5	4	25	1,5
Вход 2	2	0	20	-1,0
Линия 1	5	1	25	0,5
Линия 2	2	1	20	0
Линия 3	2	2	20	0
Линия 4	3	3	5	1

По данным этой таблицы легко проверить закон сохранения энергии в состоянии 1. Через вход 1 в ФТС поступило $20 \cdot 10^5$ Вт эксергетической мощности и столько же единиц $20 \cdot 10^5$ Вт эксергетической мощности было диссипировано в четырех линиях.

Аналогично можно проверить закон сохранения энергии в состоянии 2. Через вход 1 в ФТС поступило $37,5 \cdot 10^5$ Вт эксергетической мощности, из которых $20 \cdot 10^5$ Вт эксергетической мощности ушло из ФТС через вход 2. Поступающая через оба входа в ФТС эксергетическая мощность равна $17,5 \cdot 10^5$ Вт. Диссипация в линии 1 определяется как $12,5 \cdot 10^5$ Вт эксергетической мощности и в линии 4-5 $\cdot 10^5$ Вт эксергетической мощности, составляя общую величину диссипации – $17,5 \cdot 10^5$ Вт эксергетической мощности.

Числовой материал таблицы 1 может быть использован для проверки сохранения квазиэксергетической мощности, т.е. для проверки справедливости уравнения (3).

Если умножить эксергетические величины давления состояния 1 на соответствующие расходы состояния 2, то сумма произведений на входах 1 и 2 будет равна сумме произведений в линиях. Из этого следует, что применение теоремы (3) обеспечивает выполнение закона сохранения квазиэксергетической мощности:

$$\sum_{\hat{a}\hat{\sigma}^3} f'_{\hat{a}\hat{\sigma}^3} \cdot e''_{\hat{a}\hat{\sigma}^3} = \sum_{\hat{a}\hat{\sigma}^3} f'_{\hat{a}\hat{\sigma}^3} \cdot e''_{\hat{a}\hat{\sigma}^3} = 5 \cdot 1,5 + 2 \cdot (-1) = 5 \cdot 0,5 + 3 \cdot 1.$$

Эта квазиэксергетическая мощность в $5,5 \cdot 10^5$ Вт не может быть истолкована как действительная мощность или как мощность диссипации, тем не менее, она подчиняется теореме квазиэксергетической мощности (3).

Кроме того, топологоэксергетические структуры связи состояний 1 и 2 (см. рис. 3,6) позволяют записать для них законы сохранения энергии и квазиэксергетической мощности:

1. Закон сохранения энергии для состояния 1 выводится из топологоэксергетической структуры связи, представленной на рис. 3:

$$P_1 Q_1 - P_2 Q_2 + P_3 Q_3 + P_{10} Q_{10} - P_4 Q_4 = 0;$$

$$a) P_1 = P_2 = P_3 = P_{10} = P_4;$$

$$Q_1 - Q_2 - Q_4 + Q_{10} + Q_3 = 0;$$

$$P_4 Q_4 - P_5 Q_5 - P_6 Q_6 = 0;$$

$$b) Q_4 = Q_5 = Q_6;$$

$$P_4 - P_5 - P_6 = 0;$$

$$P_4 Q_4 = P_5 Q_5 + P_6 Q_6;$$

$$P_6 Q_6 - P_7 Q_7 - P_8 Q_8 = 0;$$

$$в) P_6 = P_7 = P_8;$$

$$Q_6 - Q_7 - Q_8 = 0;$$

$$P_6 Q_6 = P_7 Q_7 + P_8 Q_8;$$

$$P_8 Q_8 - P_9 Q_9 - P_{10} Q_{10} = 0;$$

$$г) Q_8 = Q_9 = Q_{10};$$

$$P_8 - P_9 - P_{10} = 0;$$

$$P_8 Q_8 = P_9 Q_9 + P_{10} Q_{10}.$$

Подставляя в первое уравнение выражение для $P_4 Q_4$, а затем выражения для $P_6 Q_6$ и $P_8 Q_8$, имеем

$$P_1 Q_1 + P_3 Q_3 - P_2 Q_2 - P_5 Q_5 - P_9 Q_9 - P_7 Q_7 = 0$$

Подставив в это выражение значения P, Q для состояния 1 (табл.1), получим:

$$5 \cdot 10^5 \cdot 4 + 2 \cdot 10^5 \cdot 0 - 5 \cdot 10^5 \cdot 1 - 2 \cdot 10^5 \cdot 1 - 2 \cdot 10^5 \cdot 2 - 3 \cdot 10^5 \cdot 3 = 0.$$

2. Закон сохранения энергии для состояния 2 выводится из топологоэксергетической структуры связи, рис. 6:

$$P_1 Q_1 + P_3 Q_3 - P_2 Q_2 - P_4 Q_4 = 0;$$

$$а) P_1 = P_3 = P_2 = P_4;$$

$$-Q_4 + Q_1 + Q_2 - Q_3 = 0;$$

$$P_4 Q_4 - P_5 Q_5 - P_6 Q_6 = 0;$$

$$б) Q_4 = Q_5 = Q_6;$$

$$P_4 - P_5 - P_6 = 0;$$

$$P_4 Q_4 = P_5 Q_5 + P_6 Q_6;$$

$$P_6 Q_6 - P_7 Q_7 = 0;$$

$$в) P_6 = P_7;$$

$$Q_6 - Q_7 = 0;$$

$$P_6 Q_6 = P_7 Q_7.$$

Подставляя в первое уравнение выражение для $P_4 Q_4$, а затем выражение для $P_6 Q_6$, имеем

$$P_1 Q_1 + P_3 Q_3 - P_2 Q_2 - P_5 Q_5 - P_7 Q_7 = 0.$$

Введем в это выражение значения P и Q для состояния 2 (табл. 1), получим:

$$25 \cdot 10^5 \cdot 1,5 + 20 \cdot 10^5 \cdot (-1,0) - 25 \cdot 10^5 \cdot 0,5 - 20 \cdot 10^5 \cdot 0 - 5 \cdot 10^5 \cdot 1 = 0.$$

3. Запись теоремы квазиэксергетической мощности для топологии, представленной на рис. 3, имеет вид

$$Q'_1 P''_1 + Q'_3 P''_3 = Q'_2 P''_2 + Q'_5 P''_5 + Q'_9 P''_9 + Q'_7 P''_7.$$

Подставляя в это выражение значения P'' и Q' для состояний 1 и 2 (табл.1), получим:

$$4 \cdot 25 \cdot 10^5 + 0 \cdot 20 \cdot 10^5 = 1 \cdot 25 \cdot 10^5 + 1 \cdot 20 \cdot 10^5 + 2 \cdot 20 \cdot 10^5 + 3 \cdot 5 \cdot 10^5.$$

Выводы

В данной работе на конкретных примерах показана практическая ценность использования теоремы квазиэксергетической мощности применительно к топологоэксергетическим структурам связи реальных ФТС. Простота и общность теоремы делают её педагогически привлекательной, а способность обобщать известные результаты и приводить к новым результатам указывает на её научную ценность.

Литература

1. Тучин В.Т., Дорохов И.Н., Горбацевич Л.Л. и др. Системный подход к моделированию массообменных процессов разложения карбоната свинца в аппарате фонтанирующего слоя// *Материалы второй Всесоюзной научной конференции «Современные машины и аппараты химических производств»*, Т.1, Чимкент, 1980, с.149-152.
2. Дорохов И.Н., Горбацевич Л.Л., Тучин В.Т. Метод автоматизированного учета геометрической информации при топологическом моделировании физико-химических систем. Деп. в ВИНТИ. №1274-78(78). «Депон. рук.» 1978, –24 с. б/о №540.
3. Тучин В.Т., Дорохов И.Н. Метод автоматизированного вывода передаточных функций и частотных характеристик физико-химических систем на основе диаграмм связи. Деп. в ВИНТИ. №3296-78(79). «Депон.рук.» 1979, №2 – 25 с., б/о №219.
4. Тучин В.Т. Системный подход к моделированию газодинамики верхней зоны доменной печи с помощью топологического метода описания физико-химических систем // *Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического семинара «Проблемы автоматизированного управления доменным производством»*, октябрь, 1983, Киев, с.15.
5. Тучин В.Т., Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Новый метод моделирования гидродинамики в аппаратах фонтанирующего слоя с помощью диаграмм связи // *Докл. АН СССР*, 1979, т.244, №23, с. 664-668.
6. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топологоэксергетический метод анализа энергосбережения физико-технологических систем // *Промышленная теплотехника*. 2003, т.25, №24, с. 116-118.
7. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Обобщенная эксергодисспативная функция как основа топологоэксергетического анализа физико-технологических систем. Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. Днепропетровск: НМетАУ, т.5, 2002, с.67-71.
8. Тучин В.Т., Долгополов И.С., Тучин С.В. Топологический подход к определению эффективности совмещенных процессов химической реакции и диффузии. Металлургическая теплотехника: Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. – Днепропетровск: НМетАУ, 2001, т.4, с.20-26.
9. Братута Э.Г., Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топологоэксергетический подход к оценке энергозатрат в физико-технологических системах.// *Інтегровані технології та енергозбереження*.–2003, 4. С. 20-27
10. Долгополов И.С., Тучин В.Т., Тучина У.Н. Разработка топологоэксергетического метода анализа энергосбережения физико-технологических систем // *Збірник тез доповідей 4-ї Всеукраїнської науково-методичної конференції “Екологія та інженерія. Стан, наслідки, шляхи створення екологічно чистих технологій”*, Дніпродзержинськ, 2002, с.235-236.
11. Долгополов И.С., Никулин А.В., Тучин В.Т. Эксергетический аспект в системе фундаментальных уравнений ФТС // *III Всеукраинская научная конференция «Математические проблемы технической механики»* (материалы конференции). Днепропетровск, 2003, с.49.
12. Тучин В.Т., Долгополов И.С., Братута Э.Г., Тучина У.Н. Энергетические аспекты топологоэксергетического метода описания физико-технологических систем (ФТС). Часть 1// *Інтегровані технології та енергозбереження*. –2004, 4. С. 81-89.
13. B.D.H.Tellegen. A General Network Theorem, with Applications. Philips Res.Rep.,7, p.254-269.